Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 13, No. 6 pp. 2465-2471, 2012

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.6.2465

선체구조 Ballast Tank 고장력 TMCP강판의 과방식중 부식피로균열 전파거동

김원범[1*]
[1]울산과학대학교 디지털기계학부 조선해양전공

Corrosion Fatigue Crack Propagation Behaviour of TMCP Steel Plate at Ballast Tank of Ship Structure under the Condition of Cathodic Overprotection

Won Beom Kim[1*]
[1]**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, School of Digital Mechanics, Ulsan College**

요 약 선박이나 심해저 해양플랜트와 같이 가혹한 해양환경에서 사용되는 강구조물에서 부식피로는 설계수명과 관련하여 해결을 요하는 중요한 문제이다. 본 연구에서는 전기방식중 과도한 전기방식이 부식피로균열 전파거동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 근래 사용이 확대되고 있는 고장력 TMCP에 대하여 합성해수중 -950mV vs. SCE의 과방식 인가전압 환경에서 부식피로균열 전파시험을 실시하고 da/dN-ΔK 선도를 구하였다. 이 선도에서 저 ΔK 영역에서는 해수중 전파속도보다 빠른 균열전파속도를 나타내었으나, 고 ΔK영역으로 갈수록 해수중 보다 늦은 균열전파속도를 나타내었다. 부식피로균열 전파속도에 영향을 미치는 인자로서 가속요인과 감속요인으로 나누고 각각 수소기체와 석회질생성물의 역할에 대하여 고찰하였다.

Abstract For the steel structures those are used in harsh sea environments, corrosion fatigue is a challenging issue in connection with design life. In this research, in order to investigate the influence of cathodic overprotection on the corrosion fatigue crack propagation behavior, corrosion fatigue crack propagation test under the condition of -950mV vs SCE was conducted by using of high tensile TMCP steel plate and the relationships between da/dN-ΔK were obtained. At this test, when ΔK is low, the crack propagation rates were accelerated compared to those of seawater condition, however, when ΔK is high, the crack propagation rates were lower than those of seawater condition. As the cause for the acceleration and deceleration of corrosion fatigue crack propagation rates under the condition of cathodic overprotection, the role of hydrogen and calcareous deposits are discussed.

Key Words : Fracture Mechanics, Corrosion Fatigue, Cathodic Overprotection, Synthetic Seawater

1. 서론

선박, 해양플랜트 등은 사용환경이 해상이나 subsea, 해저의 가혹한 해양부식환경에 있으며 파랑이나 조류와 같은 지속적인 반복하중을 받아 피로현상이 발생하게 된다. 이와 같은 반복하중에 의한 구조피로현상은 구조물의 강도확보를 위하여 파악해두어야 하는 중요한 문제중의 하나이다. 그리고 해수중에서의 강재의 피로강도는 대기중에 비하여 저하하거나, 균열 발생시 해수의 영향으로 대기중보다 피로균열 전파속도가 가속된다.

본 논문은 울산과학대학교 연구과제로 수행되었음.
*Corresponding Author : Won Beom Kim
Tel: +82-52-279-3135 email : wbkim@uc.ac.kr
접수일 12년 03월 26일 수정일 (1차 12년 04월 16일, 2차 12년 04월 23일) 게재확정일 12년 06월 07일

이와같은 현상은 해수중 부식피로나 부식피로균열전파에 관한 연구결과에서 잘 알려져 있다[1,2]. 따라서 선박이나 해양플랜트에서는 부식에 대한 방지 대책으로 도장과 전기방식을 방식수단으로 채택하고 있다[3,4].

선박, 해양플랜트는 수많은 용접이음으로 이루어진 구조물이며 파랑 등의 반복하중으로 인하여 균열이 발생하기 쉬운 구조를 이루고 있다. 이들 구조에서는 수없이 존재하는 구조적 불연속부나 용접결함 등으로부터 초기 또는 사용중 균열이 발생한다. 특히 선박에서 고장력강을 사용하는 개소에서 수많은 피로파괴가 발생하였다[5]. 따라서 구조물의 수명은 노치나 균열의 유무, 방식설비의 유무 그리고 환경의 영향에 따라 많이 달라질 수 있다. 방식수단중 희생양극이나 ICCP와 같은 전기방식은 해수와 같은 전해질 용액이 없는 곳에서는 작용하지 못하므로 도장과 전기방식을 병용하여 사용하고 있다. 희생전극의 경우 설치시 구조물의 표면으로부터 일정높이를 띄워 설치하고 있으며 설치하는 희생전극의 개수는 방식전위값에 영향을 미치게 된다[6].

본 연구에서는 이와같은 상황에서 과방식이 된 경우를 상정하여 과방식환경이 되었을 때 균열에 미치는 영향에 대해서 근래 사용이 확대되고 있는 고장력 TMCP강을 대상으로 고찰하였다.

2. 선박 및 해양구조물의 방식법

2.1 선박 및 해양구조물의 방식법

선박이나 해양구조물에서는 해수에 의한 부식으로부터 구조물의 보호를 위해 도장(Coating)과 전기방식(Cathodic protection)을 시행하고 있다[3,4]. 전기방식에는 희생양극법(Sacrificial anode)과 외부전원법(Impressed Current Cathodic Protection)에 의한 방식이 있다. 예를 들어, 선박에서는 밸러스트 탱크(ballast tank)에 대해서는 epoxy coating에 의한 도장을 시행하고, 선체에 대해서는 도장 뿐만 아니라 Al 또는 Zn 등에 의한 희생양극이나 외부전원법 (Impressed Current Cathodic Protection)으로 전기방식을 시행하고 있다. 이와 같이 전기방식을 시행함으로써 시간경과에 따른 도막열화와 사용중의 도막의 파손에 의한 부식으로부터 구조물의 부식손상을 방지할 수 있다.

한편, 선박이나 해양구조물은 파랑과 조류등에 의해 반복적인 피로하중을 받게 된다.

대기중의 피로강도와 달리 부식환경하의 구조재료의 S-N곡선에서는 피로한도가 나타나지 않으며 전기방식효과가 충분하면 S-N곡선은 대기중의 S-N곡선까지 회복된다고 알려져 있고, 노치재의 경우 부식피로 수명에 미치는 전기방식효과는 -800mV에서 최대이고 -1000mV이상의 과전위에 의한 과잉방식하에서는 피로수명이 현저하게 저하한다고 알려져 있다[7].

그리고 균열재의 경우 부식피로균열 전파수명에 미치는 전기방식효과에 대해서, Suzuki는 방식(cathodic protection)으로 인하여 부식피로균열 전파속도가 가속한다는 보고와 감속한다는 보고가 있다고 하였다[8]. 저자의 이전의 연구에서, 적정방식수준인 -800mV vs. SCE (Saturated Calomel Electrode)에서는 해수중 및 대기중 피로균열 전파곡선의 중간 정도의 수명을 나타내었다[9].

본 연구에서는 고장력 TMCP강판에 대하여 과방식상태인 −950mV vs. SCE에서 부식피로균열 전파특성에 대하여 고찰하였다.

2.2 부식 및 전기방식의 메커니즘

선박이나 해양구조물등의 강구조물의 해수중 자연전위에서의 강재부식에 대한 전기화학적 반응[10]은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Anode 에서의 철의 산화반응:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$

Cathode 측에서의 산소 환원반응:

$$O_2 + 2H_20 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$$

Cathode 측 수소방출:

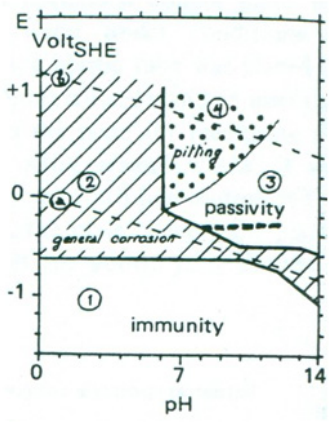
$$2H_20 + 2e^{-} \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^{-}$$

과방식인 경우 cathode측에서의 전기화학적 반응으로 수소기체가 발생하게 되고, 균열전파면에서 수소의 집합에 의한 수소취화균열(HE) 현상이 발생한다.

한편 이 반응에서 생성된 알칼리는 해수중의 염화마그네슘이나 염화칼슘과 같은 성분과 결합하여 난용성 수산화물 또는 탄산염으로 석출되고[11] 균열면 사이에서 쐐기효과(wedge effect)를 일으키는 석회질생성물(calcareous deposits)로 작용한다.

그림 1은 Pourbaix[12]가 해수중 철의 전위-pH관계를 실험적으로 나타낸 그림으로, 철의 부식역, 비부식역, 부동태역의 실험결과를 나타내고 있다. 방식전위의 기준으로 -780mV vs. SCE 이하일 때 실험적으로 안전하게 전기방식이 된다고 알려져 있다[12].

따라서 본 연구에서는 충분한 방식상태이지만 과방식의 우려가 있는 전위에서 피로균열의 전파특성을 명확히 하고 이 과정에서의 부식과 관련하여 발생하는 현상을 명확히 하는 것을 목적으로 하였다.



[그림 1] 비부식역, 전면부식, 부동태역, 공식역에 대한 염수(cl-이온 355ppm)중 철의 전위-pH 실험도표 [12]

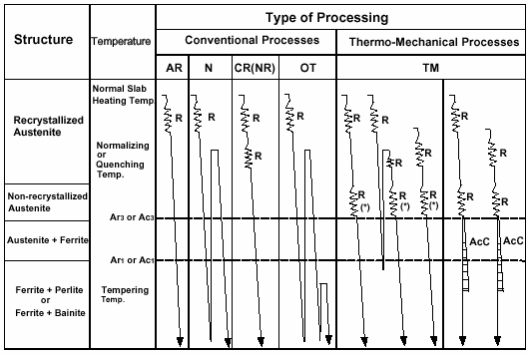
[Fig. 1] Potential-pH diagram showing the experimental conditions of immunity, general corrosion, passivity, and pitting with chloride [12]

3. 과방식중 부식피로균열 전파시험

3.1 시험재료 및 시험편

본 연구에서는 선박 및 해양구조물 구조부재용 고장력 TMCP강을 사용하여 시험편을 제작하고 해수중 과방식 환경에서의 부식피로균열 전파시험을 실시하였다.

TMCP강은 고인성화를 위하여 재료특성상 용접성에 영향을 미치는 영향이 큰 화학미량원소 첨가 방법을 사용하지 않고, 열처리를 통하여 강도와 인성을 향상시킨 강재이다. 그림 2에 TMCP강에 대한 IACS의 압연열처리의 모식도를 나타내었다[13].



[그림 2] TMCP강과 종래강의 압연 및 열처리 모식도

[Fig. 2] Schematic diagrams of Thermo- Mechanical and Conventional Process

표 1 및 2 에는 본 연구에 사용한 공시강의 기계적 성질 및 화학성분을 나타내었다. 그림 3에 본 연구의 해수중 피로균열 전파시험에 사용한 CCT (Center-Cracked-Tension) 시험편을 나타내고 있다. CCT시험편의 중앙에 관통형 슬릿을 넣어 균열이 전파할 수 있도록 제작하였다.

[표 1] 공시 TMCP강의 기계적 성질

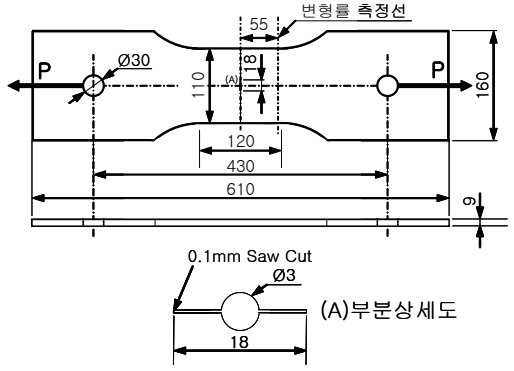
[Table 1] Mechanical properties of TMCP steel plate used

Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
390	496	29

[표 2] 공시 TMCP강의 화학적 성분

[Table 2] Chemical composition of TMCP steel plate used

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.20	1.14	0.016	0.004



[그림 3] 공시 CCT 피로시험편

[Fig. 3] CCT fatigue test specimen used

3.2 시험환경

본 연구에서의 과방식 해수중 피로균열 전파시험환경으로는 ASTM (D1141)에서 규정한 성분을 가지는 합성해수를 사용하고 공기포화상태에서 시험하였다. 또한 0.1N 수산화나트륨을 사용하여 pH는 8.2로 조절하였다.

부식피로강도는 해수온도 및 하중반복속도의 영향을 강하게 받으므로 온도는 25±1℃에서 시험 하였다. 해수환경으로 자연해수, 3% NaCl 또는 합성해수(Synthetic Seawater) 등을 고려할 수 있다. 그런데 실제 자연해수는 지역에 따라 그 조성이 다른 것으로 알려져 있다[7].

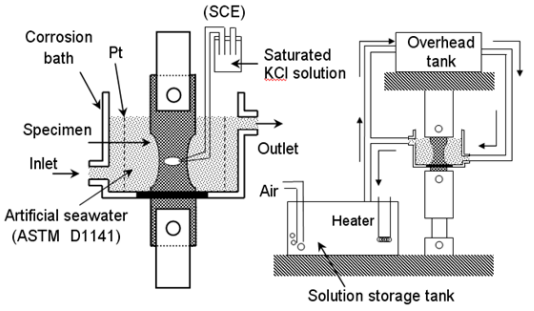
3% NaCl은 실제 해수에서 존재하는 염화마그네슘이나 염화칼슘등의 무기물질이 포함되어 있지 않다. 해수조성중의 이들 무기물질은 cathode 반응에 의해 생긴 알칼

리와 결합하여 난용성 수산화물 또는 탄산염을 형성하고 이후의 부식작용을 방해하는 역할을 한다[11].

또한 균열면 사이에서 쐐기효과(wedge effect)를 일으켜 균열전파속도를 감속시키는 요인으로 알려져 있다[8]. 따라서 이런 이유로부터 ASTM (D1141)에서 정의되어 있는 실제 해수와 같은 조성의 부식시험용 합성해수를 사용하여 실험을 실시하였다.

3.3 방식환경하 부식피로균열 전파시험

그림 4는 부식피로균열 전파시험을 위하여 본 연구에서 사용한 피로시험장치이다. 피로시험은 용량 50Ton의 피로시험기를 사용하여 삼각파에 의하여 피로시험을 수행하였다.



[그림 4] 과방식중 부식피로균열 전파시험설비
[Fig. 4] Corrosion fatigue crack propagation test apparatus under the cathodic over-protection condition

부식피로강도는 하중반복속도의 영향을 강하게 받으므로 주기는 파랑외력의 속도에 맞추어서 10cpm으로 실시하고 응력비 R은 0.1로 하였다.

부식피로시험용 시험탱크는 염화비닐로 제작하였고 시험편에는 실리콘 패킹을 부착하여 시험탱크에 고정하고 시험편의 평행부가 해수중에 침적되도록 하였다. 시험수조는 공기공급기에 의하여 충분한 공기를 공급하여 공기포화의 조건하에서 실험을 실시하였다.

본 실험에서는 과방식의 조건을 위하여 백금망을 시험편 둘레에 설치하고, 전기방식용 대극으로 사용하였다. 시험편 전위제어는 포텐시오스태트(potentiostat)를 사용하고 시험수조 외부에 설치한 포화켈로멜전극(SCE, Saturated Calomel Electrode)을 참조전극으로 하여 제어하였다. 참조전극은 포화 염화칼륨이 들어 있는 한천을 유리관을 통하여 연결하고 염교(salt bridge)로 사용하였다. 시험편의 표면 3mm의 위치에 유리관의 끝이 위치하도록 하였다. 본 연구에서 인가전압은 -950mV로 하였다.

3.4 균열길이 측정

균열길이의 측정은 이동식현미경으로 1/100mm의 정확도로 측정을 하였다. 또한 부식탱크에 공급되는 해수의 유속을 0.004m/sec로 일정하게 유지하여 시험편에 접하는 산소의 양이 일정하도록 하였다. 균열길이의 측정은 시험편의 양면에서 실시하였으며 양면의 평균치를 균열길이로 하였다.

3.5 시험편의 J integral 계산

본 연구에서 과방식하의 da/dN-ΔK관계를 구하기 위한 CCT 시험편의 유한판에 대한 응력확대계수범위 ΔK의 계산에서, 유한판폭의 경계조건을 고려한 형상계수 f(α)를 계산해야 한다. 평행부에 균일한 응력이 가해지는 경우 무한판에 대한 K치로서는 Isida의 해[14]가 알려져 있으나 본 연구에 사용하는 CCT 시험편의 경우 핀하중으로 시험편에 하중을 부하하므로 엄밀히는 평행부에 균일한 응력이 작용하는 경우의 Isida의 해를 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 그림 5와 같이 FEM으로 균열근방의 응력, 변형률, 변위를 구하고 이것으로부터 그림 6과 같이 균열근처의 J적분값을 계산하여 f(α)를 고려하고 핀하중에 의한 CCT시험편의 K치를 구하였다. J적분은 다음과 같이 구할 수 있다[Anderson, 1995].

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x}) ds \quad (1)$$

여기서

W: strain energy density
T: Γ의 외향법선방향 traction벡터
u: 변위벡터
ds: Γ에 따른 길이증분

여기서

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

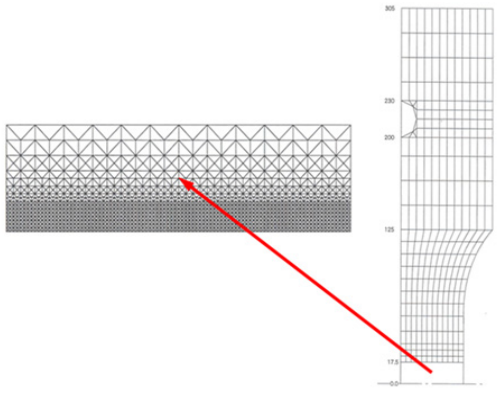
$$T_i = \sigma_{ij} n_j$$

n_j : 단위벡터

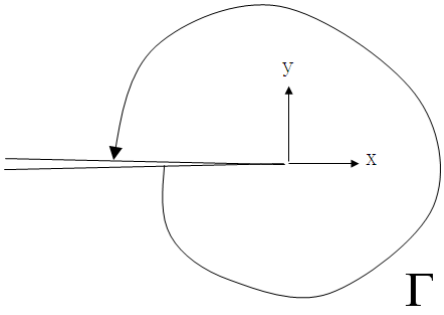
여기에서 구한 J값은 평면응력상태일 때 (1)식이 성립하는 것으로부터 K값을 구할 수 있다.

$$J = \frac{K_I^2}{E} \quad (2)$$

그리고 CCT시험편의 균열길이 2a를 변화시켜 K값을 구하고 이것으로부터 구한 형상계수 F(α ,β)를 표 3에 나타내었다.



[그림 5] J적분 계산을 위한 FEM 모델
[Fig. 5] FEM model for the calculation of J integral



[그림 6] J 적분 경로
[Fig. 6] Contour for J integral calculation

[표 3] 계산된 CCT시험편의 형상계수 F(α ,β)
[Table 3] Calculated boundary correlation factor F(α ,β) of CCT specimen

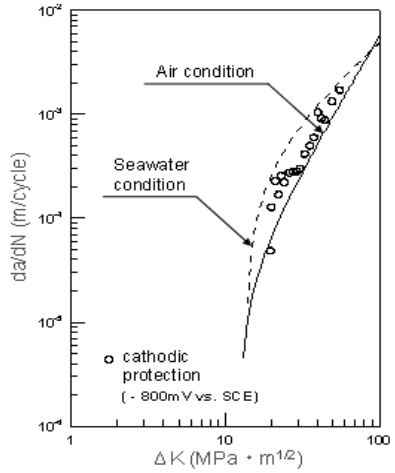
α(a/W)	F(α/β)			mean F(α/β)
	contour 1	contour 2	contour 3	
0.125	1.0066	1.0063	1.0061	1.006
0.135	1.0092	1.0088	1.0086	1.009
0.145	1.0120	1.0114	1.0111	1.012
0.200	1.0269	1.0259	1.0252	1.026
0.300	1.0662	1.0648	1.0638	1.065
0.400	1.1170	1.1155	1.1142	1.116
0.500	1.1989	1.1971	1.1956	1.197
0.600	1.3075	1.3054	1.3035	1.305
0.700	1.4951	1.4923	1.4898	1.492
0.750	1.6350	1.6316	1.6285	1.632

4. 과방식중 피로균열 전파거동 고찰

4.1 대기, 해수중 및 적정 방식중 전파거동

앞선 연구에서는 대기중, 해수중[15] 및 적정 방식중[9] TMCP강재에 대한 부식피로균열 전파거동에 대하여 고찰하였다.

그림 7에서 적정방식중 해수중에서의 균열전파속도는 구간에 따라 차이는 있으나 대기중에 비해 가속된 전파속도를 나타내고 있다. 둥근 마크로 표시된 적정 방식하의 균열전파거동에서는 해수중과 대기중 사이의 전파거동을 나타내어, 방식하에서도 대기중 만큼 회복되지는 못하는 것이 관찰되었다.

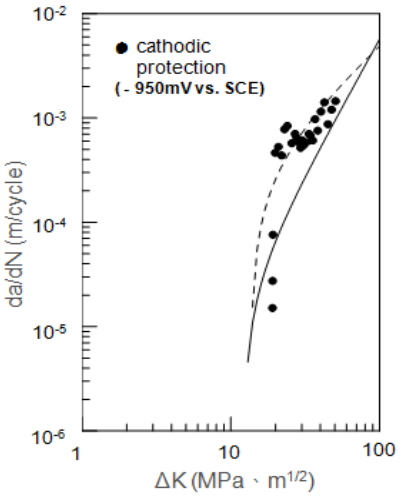


[그림 7] 방식환경중의 부식피로균열 전파거동 da/dn-ΔK[9]
[Fig. 7] Corrosion fatigue crack propagation behaviour of da/dn-ΔK under the condition of cathodic protection

4.2 해수중 과식중 부식피로균열 전파거동

본 연구에서는 희생전극의 부착갯수 및 위치 등에 따른 선체구조 밸러스트 탱크에서 -950mV vs. SCE의 과방식을 상정하여 이 전위에서의 부식피로균열의 전파거동에 대한 실험을 수행하였다. 그림 8에서 검은 마크는 과방식환경에서의 부식피로균열 전파실험결과를 나타내고 있다. 부식환경에서 피로균열 전파거동에 미치는 영향에 대하여 해수부식환경에서 균열전파속도를 가속하는 인자로서 균열선단의 부식용해, 균열전파속도를 감속시키는 인자로서 녹(rust)에 의한 쐐기효과를 고려하는 것이 가능하나, 적정 방식환경에서는 부식용해와 녹에 의한 쐐기효과의 영향은 없어지게 된다. 그러나 과방식 조건이 되면 발생하는 수소기체는 균열전파를 촉진하며, 과방식시 자연해수나 인공해수에서 생기는 석회질 생성물(calcareous

deposits)은 쐐기효과(wedge effect)로 균열전파속도를 억제하는 인자로서 작용한다.



[그림 8] 과방식환경중의 부식피로균열 전파거동 da/dn-ΔK
[Fig. 8] Corrosion fatigue crack propagation behaviour of da/dn-ΔK under the condition of cathodic overprotection

과방식하의 부식피로균열 전파거동에 대한 da/dn - ⊿K 선도에서는 이러한 각 인자들의 영향으로, 약 30MPa·m$^{(-1/2)}$ 이하의 저 ⊿K 영역에서는 해수중 전파속도 보다 빠른 전파속도를 나타내었으나 이 보다 고 ⊿K 영역으로 갈수록 해수중보다 늦은 전파속도를 나타내었다. 이것은 저 ⊿K영역에서는 균열전파속도를 가속시키는 인자가, 고 ⊿K영역에서는 균열전파속도를 감속시키는 인자의 영향이 더 강하게 작용하였기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 과방식하 합성해수중 파랑주기를 고려한 CCT 시험편에 의한 부식피로균열 전파시험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

30MPa·m$^{(-1/2)}$ 부근을 기준으로 저 ⊿K 영역에서는 부식피로균열 전파속도가 해수중의 전파속도보다 가속하였고, 고 ⊿K 영역에서는 부식피로균열 전파속도가 해수중의 전파속도보다 감속하였다. 두 경우 모두 대기중에서의 전파속도보다는 가속하여 전파하였다. 본 연구의 과방식하에서 피로균열전파하한계치는 19.1MPa·m$^{(-1/2)}$로 나타났다.

전기방식중 과방식 환경에서 부식피로균열 전파거동에 대한 본 연구결과는 해수환경에서 안전한 강구조물 설계를 위한 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] W. B. Kim, et al., "Fatigue Strength of Rusting Decayed Hull Steel Plate in Air and Artificial Sea Water Condition", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.43, No.4, pp.467-475, 2006.

[2] S. Sivaprasad, et al., "Corrosion Fatigue Crack Growth Behaviour of Naval Steels", Corrosion Science, Vol. 48, pp. 1996-2013, 2006.

[3] IACS. Common Structual Rules for Double Hull Oil Tankers, Section 6 Materials and Welding, 2 Corrosion Protection including Coatings, 2010

[4] S. Evans, "Deep Water Platform Protection Using Coatings Combined with Cathodic Protection", Cathodic & Anodic Protection, pp. 16-19, April 1992.

[5] W. Fricke et al., "Comparative Fatigue Strength Assessment of a Structural Detail in a Containership Using Various Approaches of Classification Societies", Marine Structures, Vol. 15, pp. 1-13, 2002.

[6] M. Iwata et al., "Estimations on the Cathodic Protection in Double Bottom Ballast Tank", The West-Japan Society of Naval Architects, No. 91, pp. 193-200, 1995.

[7] R. Ebara, “Current Status and Future Problems on Corrosion Fatigue Research of Structural Materials”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 59, No. 557, pp.1-11, 1993

[8] Y. Suzuki, "Corrosion Fatigue Crack Propagation of Mild Steel under Cathodic Protection in Natural Sea Water," Boshoku Gijutsu, Vol. 33, No.7, pp.402-408, 1984.

[9] W. B. Kim et al., "Evaluation of Corrosion Fatigue Crack Propagation Characteristics of TMCP Steel in Synthetic Seawater under Cathodic Protection," Advanced Materials Research, Vol. 26-28, pp.1145-1148, 2007.

[10] R. B. Griffin et al., "Prediction of Dynamic Current Density on Cathodically Protected Steel in Seawater at Different Depths," Houston International Corrosion Conference Proceedings, Technical Session 35, Cathodic Protection, Houston, Texas, May, 1993.

[11] G. Wranglen, An Introduction to Corrosion and Protection of Metals, pp.222, Halsted Press, 1972

[12] G. Wranglen, An Introduction to Corrosion and Protection of Metals, pp.167, Halsted Press, 1972
[13] IACS, Unified Requirements W Materials and Welding, W11 Normal and higher strength hull structural steels, p.4, 2008
[14] Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 1, Pergamon Press (1987)
[15] W. B. Kim et al., "Corrosion Fatigue Crack Propagation Characteristics of TMCP Steel in Synthetic Seawater Condition under Wave Period," Key Engineering Materials, Vol. 345-346, pp.1043-1046, 2007.

김 원 범(Won Beom Kim) **[정회원]**

- 1993년 2월 : 부산대학교 공과대학원 조선공학과 (공학석사)
- 1997년 6월 : Hiroshima대학교 대학원 공학연구과 조선구조공학전공 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 울산과학대학교 디지털기계학부 조선해양전공 교수

<관심분야>
파괴역학, 부식피로강도, 용접구조강도, 선체 및 기자재 도면검사